乳酸菌胞外多糖益生功能研究进展

杜瑞平[1]　郭　帅[2]　潘　娜[2]　修　磊[2]　王丽思[3]

(1.内蒙古农牧业科学院动物营养与饲料研究所，呼和浩特 010031；2.内蒙古大学生命科学学院，呼和浩特 010021；3.包头市固阳县农牧业综合行政执法大队，包头 014200)

摘　要：乳酸菌是公认的食品安全级微生物，其所产胞外多糖是乳酸菌生长代谢过程中产生并分泌于胞外的一种糖类化合物，有多种益生功能，如免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、调节肠道微生态平衡等。目前，国内外学者对乳酸菌胞外多糖的结构、功能及应用进行了深入研究。本文综述了乳酸菌胞外多糖益生功能的国内外研究进展，并对胞外多糖的作用机制作了简要概述，同时讨论了存在的问题及未来的研究方向，旨在为乳酸菌胞外多糖在动物营养中的进一步研究和生产应用提供理论参考。

关键词：乳酸菌；胞外多糖；益生功能

中图分类号：S816　　文献标识码：A　　文章编号：

乳酸菌（lactic acid bacteria，LAB）是公认的绿色安全（generally regarded as safe，GRAS）级微生物，其在人体、动物、植物和整个自然界中广泛分布[1]。研究发现乳酸菌主要通过在机体肠道内定植来改善肠道微生态环境，并具有抗肿瘤、抗炎、抗过敏、免疫调节等生理功效[2]。目前的研究表明乳酸菌的上述功能可能与其次生代谢产物胞外多糖（exopolysaccharide，EPS）有关。自然界中产胞外多糖的乳酸菌很多，目前研究的大多数菌株是从乳及乳制品、传统的发酵食品、动物肠道中分离获得的。近些年来，由于消费者的需求重点向天然无残留的安全健康的食品转移，所以乳酸菌胞外多糖的性质和生理功能受到越来越多的重视。根据相关研究报道，乳酸菌胞外多糖已可以应用于酸奶、干酪乳等食品中，并作为益生元加以利用[3]。同时，乳酸菌胞外多糖还作为天然添加剂应用于食品、化工、医药、畜牧业等领域[4]。本文重点介绍了近些年来乳酸菌胞外多糖的益生功能及其作用机制研究进展，并对其在动物营养中的研究进展作一概述。

1　乳酸菌胞外多糖简介

多糖是一类由醛糖或酮糖通过糖苷键连接而成的天然高分子聚合物，广泛分布于动植物、真菌、藻类和细菌中，根据来源不同可分为动物多糖、植物多糖和微生物多糖（真菌多糖、藻类多糖和细菌多糖）。微生物多糖的存在形式主要包括构成微生物细胞成分的胞内多

收稿日期：2017-12-28
基金项目：内蒙古自然科学基金项目（2017MSLH0310）；杨胜先生门生社群项目（B2016012）
作者简介：杜瑞平（1979-），女，内蒙古包头人，副研究员，博士，研究方向为反刍动物营养调控理论与技术。E-mail: duruiping1989@163.com

糖、黏附在细胞表面作为维持细胞形态的结构性多糖以及分泌到培养基中的胞外多糖[5]。作为细菌多糖目前的主要研究对象，乳酸菌胞外多糖是乳酸菌在生长代谢过程中合成并分泌于细胞外或渗入培养基中的多糖及其混合物，可以分为荚膜多糖和黏液多糖[6-7]，又可以分为同多糖（homopolysaccharide，HoPS）和杂多糖（heteropolysaccharide，HePS）[8]。乳酸菌胞外多糖中单糖种类和组成比例受到菌株类型、培养基成分和培养条件等诸多因素的影响。大量研究结果表明，乳酸菌胞外多糖在帮助微生物抵御脱水、营养缺乏、噬菌体、渗透压、拮抗物和有毒物质等不利条件时发挥重要作用[9]，具有抗肿瘤、抗菌、抗氧化和免疫调节等生理活性[6]。

2 乳酸菌胞外多糖的生理调节作用

2.1 免疫调节作用

乳酸菌胞外多糖的免疫调节功能主要是通过激活免疫细胞（如巨噬细胞、B淋巴细胞、T淋巴细胞等）、促进单核细胞吞噬能力和调控免疫细胞因子（如补体、白细胞介素等）的分泌来调节机体的免疫功能[10-11]。Kishimoto等[1312]将德氏乳杆菌产生的胞外多糖作用于人的肠上皮Caco-2细胞和小鼠巨噬细胞RAW264.7，结果显示这2种细胞均分泌了大量的肿瘤坏死因子α（TNF-α）和多种细胞因子。Morifuji等[1413]研究发现，给9周龄的小鼠连续灌胃发酵乳或者胞外多糖10 d后，将小鼠背部皮肤暴露于紫外线（20 MJ/cm^2）中，小鼠背部皮肤无损伤，表明无论是摄入发酵乳还是胞外多糖都能显著减弱紫外线所诱导的红斑形成、皮肤干燥及表皮增殖。分子机制研究发现从乳酸菌发酵乳中分离出的胞外多糖增强了DNA的修复机制并提高了皮肤的免疫力，因而能够保护皮肤免受紫外线损伤。乳酸菌胞外多糖还可分为酸性胞外多糖（APS）和中性胞外多糖（NPS）[1514]。Nishimura-Uemura等[1615]利用保加利亚乳杆菌OLL1073R-1产生的NPS和APS来培养小鼠巨噬细胞J774.1，并以巨噬细胞形态以及一氧化氮（NO）、细胞因子的产量为指标，探究乳酸菌胞外多糖引起的巨噬细胞功能的变化，结果显示：在细胞形态方面，APS能够刺激巨噬细胞激活，而NPS几乎无刺激作用；NPS和APS均不能诱导巨噬细胞产生NO；小鼠巨噬细胞经APS刺激后细胞因子mRNA的表达量高于NPS刺激后的表达量。该试验结果证明该菌所产APS具有促进小鼠巨噬细胞免疫功能的作用。

乳酸菌胞外多糖的免疫调节作用也可能与其分子结构有关。研究显示，含有磷酸基团或者硫酸基团的胞外多糖能更有效地诱导免疫细胞的增殖、活化或分泌细胞素类物质[1716]。Laiño等[1817]阐述了乳酸菌胞外多糖发挥免疫功能的一种新分子机制，研究中以小肠上皮细胞为模型，探究2种乳酸菌菌株产生的胞外多糖与宿主细胞的分子间相互作用，结果显示2

种乳酸菌菌株产生的胞外多糖均能降低缺乏Toll样受体（TLR）细胞的炎性因子表达量；已知胞外多糖可以依赖于TLR2、TLR4和TLR信号通路的负调控发挥免疫作用，在此基础上，该研究还发现乳酸菌和胞外多糖以RP105/MD1途径来减少小肠上皮细胞的炎症。因此，从目前的研究来看，由于乳酸菌胞外多糖具有菌株特异性，不同菌株产生的胞外多糖种类、结构、分子质量等的物化差异性较大，这些差异性直接导致了这些胞外多糖具有不同的特定功能，因此，在对新分离的乳酸菌胞外多糖的功能筛选时，对其进行免疫活性的研究是非常有必要的。

2.2 抗肿瘤功能

能产生胞外多糖的乳酸菌种类有很多，其中能产生具有抗肿瘤作用的胞外多糖所对应的乳酸菌目前探明的包括嗜酸乳杆菌（*Lactobacillus acidophilus*）、唾液乳杆菌（*Lactobacillus salivarius*）、植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum*）、两歧双歧杆菌（*Bifidobacterium bifidum*）、长双歧杆菌（*Bifidobacterium longum*）等20多种[1918-2019]。目前，研究者们对某些具有抗肿瘤、抗癌活性的乳酸菌胞外多糖展开了研究。Wang等[2120]研究了植物乳杆菌70810所产胞外多糖对肿瘤细胞HepG-2、BGC-823和HT-29的抗肿瘤活性，结果显示，胞外多糖对3种肿瘤细胞均有较高的抑制率[依次为（56.34±1.07）%、（61.57±2.07）%、（88.34±1.97）%]，尤其是对肿瘤细胞BGC-823和HT-29。所以，植物乳杆菌70810所产的胞外多糖可能适合作为功能食品和天然抗肿瘤药物。刘鹭等[2221]研究了硒化乳酸菌胞外多糖对胃癌SGC7901细胞和宫颈癌Hela细胞内游离钙离子（Ca^{2+}）的影响，结果显示，加入胞外多糖后2种癌细胞内Ca^{2+}荧光强度呈现持续动态下降趋势。其作用机制可能与胞外多糖进行硒化修饰有关，即硒化后的胞外多糖与肿瘤细胞表面受体结合，引起细胞内游离Ca^{2+}的减少，由此说明硒化后的胞外多糖可引起肿瘤细胞发生不同程度的凋亡。Ismail等[2322]提取了植物乳杆菌MTCC 9510的胞外作用于乳腺癌MCF-7细胞，结果发现由植物乳杆菌MTCC 9510产生的胞外多糖的确对乳腺癌MCF-7细胞有明显的抑制作用，证明了胞外多糖的确有抗肿瘤作用。Wang等[2423]通过噻唑蓝（MTT）法检测人结肠癌HT-29细胞的生长，研究了不同浓度（50、100、200、400和600 μg/mL）和不同时间（24和72 h）条件下植物乳杆菌YW32产生的胞外多糖的抗肿瘤活性，结果显示，胞外多糖的抑制活性具有浓度依赖性，在胞外多糖剂量为600 μg/mL时具有最高的抑制率（39.24%）。据Leng等[2524]报道，乳酸菌胞外多糖的抗氧化和活性氧（reactive oxygen species，ROS）的水平可能与癌细胞的生成与转化密切相关，高的抗氧化水平可能增强抗肿瘤活性。Wang等[2423]推测，来源于植物乳杆菌YW32的胞外多糖的抗肿瘤活性可能与其对羟基和超氧自由基的清除能力有关，故来源于植物乳杆菌YW32的胞外多糖可以作为天然健康食品用于

结肠癌的治疗。此外，还有文献指出抗肿瘤活性的差异可能与乳酸菌胞外多糖的组成、分子质量、分子结构以及硫酸盐的含量有关[2625-2726]。

目前发现的乳酸菌胞外多糖抗肿瘤机制可能为以下几种：一、通过增强机体免疫力和抗氧化能力来间接实现其抗肿瘤作用；二、通过诱导肿瘤细胞凋亡来实现抗肿瘤作用；三、乳酸菌利用胞外多糖增加在肠腔内定植，从而竞争性排斥致癌病原菌在肠腔内的黏附。此外，产胞外多糖的乳酸菌能够降低肠道内细菌酶、β-葡萄糖醛酸酶等的活性，减少具有致癌作用的次级胆酸量，降低患癌的风险[2827]。

2.3　抗氧化功能

氧化应激反应是指当机体处于不利环境（如病原菌感染、辐射刺激或有外源自由基入侵）时，活性氧平衡状态被破坏，从而引发超出正常范围的活性氧产生攻击作用，破坏细胞，诱发机体疾病，危害机体健康[2928]。张玉龙等[3029]以分离自传统发酵食品的36株乳酸菌为受试菌，筛选出8株高产胞外多糖的乳酸菌，并对它们所产的胞外多糖进行抗氧化活性的研究，测定所产胞外多糖的总还原力、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）清除能力、螯合二价铁离子（Fe^{2+}）的能力及亚硝酸根离子（NO_2^-）清除能力，结果显示，这8株乳酸菌所产胞外多糖均具有抗氧化活性，当胞外多糖质量浓度为30 μg/mL时，乳酸菌SR2-2、SR8和SR12-1所产胞外多糖对Fe^{2+}的清除率分别为15.55%、12.41%、53.21%；当胞外多糖质量浓度为40 μg/mL时，乳酸菌SR2-2、SR8和SR12-1所产胞外多糖对DPPH和NO_2^-的清除率分别达9.69%和11.93%、8.93%和5.73%、7.82%和3.82%。Li等[3130]研究了双歧杆菌WBIN03和植物乳杆菌R315所产胞外多糖的抗氧化活性，结果表明，2种胞外多糖在高浓度条件下都对DPPH和超氧自由基具有很强的清除能力，其抗氧化活性呈现出剂量依赖效应。

对于胞外多糖的抗氧化机制，目前还没有确定的结论，可能的机制包括：一、多糖分子直接作用于自由基本身，或结合分解成对机体无害的产物，或发生氧化反应直接清除；二、多糖分子的螯合催化作用，自由基反应过程受阻；三、多糖分子通过提高机体抗氧化酶系活力而发挥抗氧化作用[3231]。此外，还有报道认为分子质量可能与多糖的抗氧化活性有关，分子质量越小，抗氧化活性越强[3332]。

2.4　对机体肠道功能的调节作用

乳酸菌胞外多糖主要通过改善肠黏膜的黏附、调节肠道微生态平衡以及为肠道供能的方式，对机体肠道起到一定的调节作用，其对肠黏膜的黏附主要依赖黏附素，包括脂磷壁酸、完整肽聚糖、表层蛋白和胞外多糖等[3433]，其中胞外多糖起重要作用。乳酸菌胞外多糖对肠道上皮细胞的黏附作用有助于其在肠道定植、增强乳酸菌与肠道细胞之间的信号交流、抑制

病原菌在肠道的定植和提高机体免疫力[3534]。乳酸菌胞外多糖增强益生菌对肠道的黏附作用主要包括特异性黏附和非特异性黏附 2 个途径。进入肠道后，乳酸菌首先依靠非特异性黏附作用在肠道表面定植，但这种黏附作用力不强，具有可逆性，其分泌的胞外多糖可以增强益生菌在肠道的黏附作用。乳酸菌经非特异性黏附在肠道局部聚集后，菌体接着会发挥特异性黏附作用和宿主细胞进行特异性识别与黏附[3635]。

Li 等[3736]研究了两歧双歧杆菌 WBINO3 对小鼠肠道微生物多样性的影响，结果显示，其所产胞外多糖能显著提高小鼠肠道内乳酸杆菌和厌氧菌的数量，抑制肠细菌、肠球菌和脆弱类杆菌的增殖，从而调节肠道微生态的平衡。研究发现乳酸菌胞外多糖到达人体结肠部位后能够被肠道菌群分解成短链脂肪酸和乳酸盐。BäckhedBackhed 等[3837]发现由乳酸菌胞外多糖分解产生的短链脂肪酸能够为人体提供 10%的能量。另有报道称，分子质量大（>10^6 u）的乳酸菌胞外多糖能够抵抗体外模拟的胃液和肠液的降解，并可作为结肠发酵的基质，为结肠提供能量[3938]。此外，也有试验发现乳酸菌胞外多糖可作为肠道菌群发酵的碳源，为菌群提供营养[4039]。

3　乳酸菌胞外多糖在动物营养中的研究进展

相比其他种类的多糖，包括乳酸菌胞外多糖在内的细菌多糖可以通过发酵生产，并具有生产周期短，不受时间、空间等条件限制等优点而具有广阔的发展前景和巨大的应用市场[4140]。目前黄芪多糖、灵芝多糖等多种多糖添加剂已被广泛应用于畜牧和水产养殖业，很好地提高了动物机体的免疫力，增强了抗病力。但目前关于乳酸菌胞外多糖生理活性的研究仍主要集中于人类、鼠类等试验模型或者在体外细胞培养条件下进行，其动物营养上的研究和应用并不多见，少量研究以单胃动物（猪、鸡）为主，反刍动物则未见报道。Chen 等[4241]研究了罗伊氏乳杆菌胞外多糖对抗仔猪肠毒性大肠杆菌（ETEC）的调节作用，结果显示，该乳杆菌胞外多糖通过减少肠毒性大肠杆菌在小肠内的定植黏附来减缓仔猪腹泻的发生。Le 等[4342]通过给断奶仔猪饲喂罗伊氏乳杆菌发酵的小麦发现，发酵谷物并没有对试验仔猪的肠道形态、小肠发酵、生长性能及营养物质表观消化率产生显著影响，但乳杆菌所产胞外多糖能刺激后肠发酵，提高机体健康水平。路则庆[4443]研究了 *E. cloacae* Z0206 富硒多糖（Se-ECZ-EPS）对肉仔鸡和断奶仔猪生长性能、胴体品质、免疫功能及肠道形态结构和肠道微生物多样性的影响，结果表明 Se-ECZ-EPS 增强了肉仔鸡和仔猪的免疫功能，有效提高了其生长性能。虽然该研究使用的是从肉灵芝中分离得到的属于阴沟肠杆菌属细菌所产胞外多糖进行的试验，但其研究思路和方法值得在乳酸菌胞外多糖上借鉴开展。笔者所在课题组对植物来源高产胞外多糖的乳酸菌菌株进行了筛选鉴定和分离纯化，已得到多株优良菌株，

并利用小鼠模型对这些乳酸菌胞外多糖的免疫调节活性和抗氧化功能进行了充分研究，下一步拟在羔羊和犊牛等幼龄反刍动物上开展应用试验，以期为乳酸菌胞外多糖的生产应用提供依据。

4 小 结

从近些年来对乳酸菌胞外多糖生理活性功能的研究可知，其有抗肿瘤、抗氧化、免疫调节和益生功能等多种作用。故理论上乳酸菌可应用于酸奶等发酵食品中，达到改善酸奶流变学性质、质地、风味、调节肠道等作用；也可应用于动物饲料添加剂，以代替抗生素使用；还可以用于医疗和保健等方面，促进人类健康。但目前乳酸菌胞外多糖仅仅在乳制品的发酵与制备方面实现了商业化，而在其他方面实现工业化生产还有诸多困难，其中最大的障碍是乳酸菌胞外多糖的转化率低、生产成本高。所以，目前关于乳酸菌胞外多糖研究的关键是通过现代分子生物学、生物信息学等技术手段获得高产胞外多糖的乳酸菌菌株，实现乳酸菌胞外多糖的高产并投入到工业化生产中。另外，目前乳酸菌胞外多糖的动物试验还停留在人和啮齿类动物及单胃动物模型上，在反刍动物上基本未见研究报道，今后可在犊牛、羔羊等幼龄反刍动物上开展研究，进一步拓宽乳酸菌胞外多糖在动物营养中的应用，充分发挥其绿色饲料添加剂的巨大潜力。

参考文献：

[1] 杨洁彬.乳酸菌:生物学基础及应用[M].北京:中国轻工业出版社,1996.

[2] MAJAMAA H,ISOLAURI E,SAXELIN M,et al.Lactic acid bacteria in the treatment of acutero tavirus gastroenteritis[J].Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition,1995,20(3):333–338.

[3] 孟利,张兰威.乳酸菌胞外多糖的生理功能及其在食品中的应用[J].现代食品科技,2005,21(4):133–136.

[4] ZANNINI E,WATERS D M,COFFEY A,et al.Production,properties,and industrial food application of lactic acid bacteria-derived exopolysaccharides[J].Applied Microbiology and Biotechnology,2016,100(3):1121–1135.

[5] 邵丽.产胞外多糖乳杆菌的筛选及其多糖的分离、结构和生物活性研究[D].博士学位论文.无锡:江南大学,2015:1–9.

[6] CAGGIANIELLO G,KLEEREBEZEM M,SPANO G.Exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria:from health-promoting benefits to stress tolerance mechanisms[J].Applied Microbiology and Biotechnology,2016,100(9):3877–3886.

[7] COSTERTON J W,IRVIN R T,CHENG K J,et al.The role of bacterial surface structures in pathogenesis[J].Critical Reviews in Microbiology,1981,8(4):303–338.

[8] 胡盼盼,宋微,杜明,等.乳酸菌胞外多糖的研究进展[J].粮油食品科技,2014,22(5):87–92.

[9] 苗君莅,于鹏,肖杨,等.胞外多糖的研究现状与展望[J].食品科技,2014(10):226–231.

[10] MAKINO S,IKEGAMI S,KANO H,et al.Immunomodulatory effects of polysaccharides produced by *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* OLL1073R-1[J].Journal of Dairy

Science,2006,89(8):2873–2881.

[11] SCHEPETKIN I A,FAULKNER C L,NELSON-OVERTON L K,et al.Macrophage immunomodulatory activity of polysaccharides isolated from *Juniperus scopolorum*[J]. International Immunopharmacology,2005,5(13/14):1783–1799.

[12] KISHIMOTO M,NOMOTO R,OSAWA R.*In vitro* evaluation of immunological properties of extracellular polysaccharides produced by *Lactobacillus delbrueckii* strains[J].Bioscience of Microbiota,Food and Health,2015,34(1):11–23.

[13] MORIFUJI M,KITADE M,FUKASAWA T,et al.Exopolysaccharides isolated from milk fermented with lactic acid bacteria prevent ultraviolet-induced skin damage in hairless mice[J].International Journal of Molecular Sciences,2017,18(1):146–156.

[14] WACHI S,KANMANI P,TOMOSADA Y,et al.*Lactobacillus delbrueckii* TUA4408L and its extracellular polysaccharides attenuate enterotoxigenic *Escherichia coli*-induced inflammatory response in porcine intestinal epitheliocytes *via* Toll-like receptor-2 and 4[J].Molecular Nutrition & Food Research,2014,58(10):2080–2093.

[15] NISHIMURA-UEMURA J,KITAZAWA H,KAWAI Y,et al.Functional alteration of murine macrophages stimulated with extracellular polysaccharides from *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* OLL1073R-1[J].Food Microbiology,2003,20(3):267–273.

[16] 王国栋,李萍,陈靠山,等.多糖激活树突状细胞的免疫调节作用[J].细胞与分子免疫学杂志,2013,29(2):204–206.

[17] LAIÑO J,VILLENA J,KANMANI P,et al.Immunoregulatory effects triggered by lactic acid bacteria exopolysaccharides:new insights into molecular interactions with host cells[J].Microorganisms,2016,4(3):27.

[18] 顾瑞霞,伊萌.乳酸菌抗肿瘤特性的研究进展[J].中国微生态学杂志,1999,11(4):253–255.

[19] 刘宇,孟祥晨.乳酸菌胞外多糖及其抗肿瘤活性[J].中国乳品工业,2008,36(1):39–43.

[20] WANG K,WEI L,XIN R,et al.Characterization of a novel exopolysaccharide with antitumor activity from lactobacillus plantarum,70810[J].International Journal of Biological Macromolecules,2014,63:133–139.

[21] 刘鹭,潘道东,丁琳,等.硒化乳酸菌胞外多糖对小鼠腹腔巨噬细胞及肿瘤细胞内游离Ca^{2+}的影响[J].食品科学,2014,35(1):250–253.

[22] ISMAIL B,NAMPOOTHIRI K M.Exposition of antitumour activity of a chemically characterized exopolysaccharide from a probiotic *Lactobacillus plantarum* MTCC 9510[J].Biologia,2013,68(6):1041–1047.

[23] WANG J,ZHAO X,YANG Y M,et al.Characterization and bioactivities of an exopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* YW32[J].International Journal of Biological Macromolecules,2015,74:119–126.

[24] LENG B,LIU X D,CHEN Q X.Inhibitory effects of anticancer peptide from *Mercenaria* on the BGC-823 cells and several enzymes[J].FEBS Letters,2005,579(5):1187–1190.

[25] CUI F J,TAO W Y,XU Z H,et al.Structural analysis of anti-tumor heteropolysaccharide GFPS1b from the cultured mycelia of Grifola frondosa,GF9801[J].Bioresource Technology,2007,98(2):395–401.

[26] TAO Y Z,ZHANG Y Y,ZHANG L N.Chemical modification and antitumor activities of two polysaccharide-protein complexes from Pleurotus tuber-regium[J].International Journal of Biological Macromolecules,2009,45(2):109–115.

[27] CHONG E S L.A potential role of probiotics in colorectal cancer prevention:review of

possible mechanisms of action[J].World Journal of Microbiology and Biotechnology,2014,30(2):351–374.

[28] LI J Y,JIN M M,MENG J,et al.Exopolysaccharide from Lactobacillus planterum LP6:antioxidation and the effect on oxidative stress[J].Carbohydrate Polymers,2013,98(1):1147–1152.

[29] 张玉龙,胡萍,王金龙,等.产胞外多糖乳酸菌的筛选及抗氧化特性研究[J].中国酿造,2015,34(10):37–42.

[30] LI S J,HUANG R H,SHAH N P,et al.Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315[J]. Journal of Dairy Science,2014,97(12):7334–7343.

[31] 李景艳.乳酸菌胞外多糖的抗氧化活性及其结构[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2013.

[32] CHEN H X,ZHANG M,QU Z S,et al.Antioxidant activities of different fractions of polysaccharide conjugates from green tea (Camellia Sinensis)[J].Food Chemistry,2008,106(2):559–563.

[33] PULTZ N J,VESTERLUND S,OUWEHAND A C,et al.Adhesion of vancomycin-resistant *enterococcus* to human intestinal mucus[J].Current Microbiology,2006,52(3):221–224.

[34] 任大勇.益生乳酸杆菌的黏附及免疫调节作用研究[D].博士学位论文.长春:吉林大学,2013.

[35] 李超,王春凤,杨桂连.乳酸菌胞外多糖肠道黏附及免疫调节作用研究进展[J].食品科学,2014,35(11):314–318.

[36] LI S J,CHEN T T,XU F,et al.The beneficial effect of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 on microbial diversity in mouse intestine[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2014,94(2):256–264.

[37] BÄCKHED F,MANCHESTER J K,SEMENKOVICH C F,et al.Mechanisms underlying the resistance to diet-induced obesity in germfree mice[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2007,104(3):979–984.

[38] SALAZAR N,RUAS-MADIEDO P,KOLIDA S,et al.Exopolysaccharides produced by *Bifidobacterium longum* IPLA E44 and *Bifidobacterium animalis* subsp.lactis IPLA R1 modify the composition and metabolic activity of human faecal microbiota in pH-controlled batch cultures[J].International Journal of Food Microbiology,2009,135(3):260–267.

[39] SALAZAR N,PRIETO A,LEAL J A,et al.Production of exopolysaccharides by *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains of human origin,and metabolic activity of the producing bacteria in milk[J].Journal of Dairy Science,2009,92(9):4158–4168.

[40] PATTEN D A,LAWS A P.*Lactobacillus*-produced exopolysaccharides and their potential health benefits:a review. Beneficial Microbes,2015,6(4):457–471.

[41] CHEN X Y,WOODWARD A,ZIJLSTRA R T,et al.Exopolysaccharides synthesized by *Lactobacillus reuteri* protect against enterotoxigenic *Escherichia coli* in piglets[J]. Applied and Environmental Microbiology,2014,80(18):5752–5760.

[42] LE M H A,GALLE S,YANG Y,et al.Effects of feeding fermented wheat with *Lactobacillus reuteri* on gut morphology,intestinal fermentation,nutrient digestibility,and growth performance in weaned pigs[J].Journal of Animal Science,2016,94(11):4677–4687.

[43] 路则庆.*Enterobacter cloacae* Z0206 富硒多糖对动物生长性能和免疫功能的影响及其作用机制研究[D].博士学位论文.杭州:浙江大学,2014:39–108.

Research Progress on Probiotic Function of Lactic Acid Bacteria Exopolysaccharides

DU Ruiping[1] GUO Shuai[2] PAN Na[2] XIU Lei[2] WANG Lisi[3]

(1. *Animal Nutrition Institute, Agriculture and Animal Husbandry Academy of Inner Mongolia, Hohhot* 010031, *China*; 2. *College of Life Science, Inner Mongolia University, Hohhot* 010021, *China*; 3. *Agriculture and Animal Husbandry Administrative Department of Guyang County, Baotou* 014200, *China*)

Abstract: Lactic acid bacteria (LAB) are generally regarded as food safety microorganisms, LAB exopolysaccharide (EPS) which are either associated with the cell surface in the form of capsules or secreted into the extracellular environment in the form of slime and has been well characterized as probiotics exerted functions in immunomodulation, antitumor, anticancer, antioxidation, intestinal microecological balance, etc. The structure, function and application of LAB EPS had been further researched by overseas and domestic scholars. This paper reviewed the research progress of probiotic function of LAB EPS and its possible molecular mechanisms, discussed the existing problems and future trends, and provided promising insights into the development of LAB EPS in animal nutrition practice.

Key words: lactic acid bacteria; exopolysaccharides; prebiotic function

Author, DU Ruiping, associate professor, E-mail: duruiping1989@163.com (责任编辑 菅景颖)